

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geoloogia osakond

Bakalaureusetöö keskkonnatehnoloogias (12 EAP)

**Ordoviitsium-Kambriumi põhjaveekihi kontseptuaalsed
mudelid fosforiidi kaevandamise tingimustes**

Liisa-Mai Nurk

Juhendajad: PhD Valle Raidla
PhD Enn Karro

Tartu 2019

Annotatsioon

Ordoviitsium-Kambriumi põhjaveekihi kontseptuaalsed mudelid fosforiidi kaevandamise tingimustes

Hüdrogeoloogilised kontseptuaalsed mudelid on esimeseks etapiks hüdrogeoloogilises uuringus, nendega esitatakse skemaatiliselt probleem ja lahendused. Käesoleva töö eesmärgiks on esitada kaks kontseptuaalset mudelit olukordadest, kui toimuks aktiivne fosforiidikaevandamine Ordoviitsium-Kambriumi põhjaveekihi. Peamised probleemid on survetasemete alanemine, hapnikurikka vee juurdevool Ordoviitsium-Kambriumi põhjaveekihti ning fosforiidikihti katva graptoliitargilliidi oksüdeerumine Toolse piirkonnas.

Märksõnad: kontseptuaalsed mudelid, Ordoviitsium-Kambriumi põhjaveekiht, fosforiit, kaevandustegevus

CERCS kood: P470 – Hüdrogeoloogia, geoplaneering ja ehitusgeoloogia

Abstract

Conceptual Models of Ordovician-Cambrian Aquifer in Conditions of Phosphorus Mining

Hydrogeological conceptual models are the first step in hydrogeological research. They will present the problem and solutions. The aim is to introduce earlier conceptual models for the Ordovician-Cambrian aquifer and to create two models considering an active phosphorus mining for the same aquifer. Main problems are lowering of the pressure levels, oxygen rich water flow into the Ordovician-Cambrian aquifer and graptolite argillite covering the phosphorus layer, which occurs in the Toolse deposit.

Keywords: conceptual models, Ordovician-Cambrian aquifer, phosphorus, mining

CERCS code: P470 – Hydrogeology, geographical and geological engineering

Sisukord

1. Sissejuhatus	4
2. Teoreetilised alused	5
2.1 Kontseptuaalse mudeli definitsioon.....	5
2.1.1 Hüdrokeoloogiliste kontseptuaalsete mudelite jaotus	5
2.1.2 Kontseptuaalse mudeli ülesehitamine	6
2.1.3 Kontseptuaalse mudeli visualiseerimine	7
2.2 Virumaa fosforiidimaardla geokeemiline taust ja probleemid	8
2.2.1 Fosforiit	8
2.2.2 Graptoliitargilliit.....	9
2.2.3 Püriidi oksüdatsioon	10
3. Ordoviitsium-Kambriumi põhjaveekiht	12
3.1 Paiknemine	12
3.2 Geoloogiline ehitus.....	12
3.3 Põhjavee päritolu ja hüdrodünaamika	13
3.4 Keemiline koostis	14
4. O-Ca põhjaveekiht kaevandusega Toolse fosforiidimaardlas	15
4.1 Mudeli ala kirjeldus	15
4.2 Kaevanduse mõju põhjavee-survetasemetele	15
4.3 Kaevanduse mõju põhjavee keemilisele koostisele	17
5. O-Ca põhjaveekiht kaevandusega Rakvere fosforiidimaardlas.....	20
5.1 Mudeli ala kirjeldus	20
5.2 Kaevanduse mõju põhjavee-survetasemetele	21
5.3 Kaevanduse mõju põhjavee keemilisele koostisele	22
Kokkuvõte	25
Summary	27
Tänuavaldused.....	28
Kasutatud kirjandus	29

1. Sissejuhatus

Kontseptuaalsed mudelid on laialdaselt kasutatav viis esitlemaks probleemi(de) olemust ja võimalike lahendusviise läbi visualiseeritud loogilise skeemi (näiteks diagramm), mis näitab valitud objekte ja nendevahelisi seoseid ning sisaldab sõnalist hüpoteesi, mis kirjeldab eeldatavaid seoseid (Spijker et al 2010). Selline lähenemisviis on kasutusel paljudes eluvaldkondades, kus on vaja luua tulevast süsteemi arendavatele või kasutama hakkavatele gruppidele ühine visioon probleemi(de) olemusest ja võimalikest lahendusviisidest, näiteks andmehaldussüsteemide, turvasüsteemide kui ka keskkonnanriskide maandamismeetmete väljatöötamisel.

Hüdrogeoloogilised kontseptuaalsed mudelid on üldjuhul skemaatilised kujutised mingist hüdrogeoloogilisest süsteemist ja nende omadustest ning käitumisest (Enemark et al 2019). Lisaks võivad need mudelid sisaldada ka bioloogilisi protsesse ja antropogeenseid mõjutegureid.

Viimastel aastatel on Eesti hüdrogeoloogias kõige enam muutunud kontseptuaalne arusaam Ordoviitsium-Kambriumi (O-Ca) põhjaveekihist. O-Ca põhjaveekiht sisaldab Euroopa suurimat fosforiidi maardlat. Fosforivajadus inimkonna arvukuse ja elujärje kasvu tõttu aina suureneb (Mogollon et al 2018) ning seega on üsna reaalne fosforiidi kaevanduste avamine O-Ca põhjaveekihis. Kaevandustegevuse mõju üle O-Ca põhjavee kvaliteedile ning varule on diskuteeritud aastaid. Käesolev bakalaureusetöö tutvustab varasemaid kontseptuaalseid mudeleid O-Ca põhjaveekihist ning esitab kaks uut kontseptuaalset mudelit, mis kirjeldavad muutusi O-Ca põhjaveekihis Rakvere ja Toolse fosforiidimaardlate kasutusele võtmisel.

2. Teoreetilised alused

2.1 Kontseptuaalse mudeli definitsioon

Laiemas plaanis võib kontseptuaalseid mudeleid defineerida mitmeti, kuid kõige üldisemalt on tegemist lihtsustatud või skemaatilise kujutisega mingist süsteemist ja tema omadustest ning käitumisest (Spijker et al 2010). Kontseptuaalne mudel koostatakse harilikult süsteemi eeluuringu etapis või hiljemalt süsteemi või probleemi analüüsi alguses. Esitatav mudel peab olema lihtsustus, kuid samas säilitama võimalikult suure kirjeldustäpsuse. Seega välditakse suurte laialivalgvate mudelite loomist, sest eesmärgiks on väike kompaktne mudel, tegemata järeleandmisi kirjelduse täielikkusele ja detailsusele. Suur laialivalgus kontseptuaalne mudel on enamasti halvasti või mittepõhjalikult tehtud analüüsitöö tundemärk (Spijker et al 2010). Siiski on mudeli keerukus ja detailsus tingitud võimalikest kasutajatest ja eesmärkidest, milleks mudel loodi.

Ka võivad mudeli omadused ja parameetrid varieeruda, sõltuvalt mudeli eesmärgist ja rakendustest, nii ruumiliselt kui ajaskaalas (tundidest aastateni). Hüdrogeoloogias on kõige tavalisemad põhjavee varude hindamise, reostuse ja vee keemilise koostise mudelid, mille alusel planeeritakse ka seirevõrgustikud (Enemark et al 2019).

Hüdrogeoloogilisi kontseptuaalseid mudeleid võib jagada eesmärkide järgi kolmeks (Spijker et al 2010):

1. üldine teaduslik fundamentaalne kontseptuaalne mudel;
2. hüdrogeoloogiline kontseptuaalne mudel;
3. mudel, mille abil erinevad valdkonnad vahetavad teadmisi.

2.1.1 Hüdrogeoloogiliste kontseptuaalsete mudelite jaotus

Fundamentaalne kontseptuaalne mudel

Fundamentaalsed mudelid on aluseks hilisematele keerukamatele, kvalitatiivsetele mudelitele, mis viivad läbi simulatsioone või kalkulatsioone. Läbi viidud simulatsioonide põhjal saab mudeleid hiljem täiendada ning seeläbi viia neid aina lähemale reaalsusele. Fundamentaalne mudel koosneb kolmest osast: (i) uuritav objekt; (ii) teoreetilised kontseptsioonid ja omadused; (iii) hüpotees, kuidas kontseptsioonid ja omadused on omavahel seotud. Lisaks

saab üht loodud mudelit kasutada paljude analoogsete uurimuste aluseks (Spijker et al 2010). Mudelite loomisel tuleb meeles pidada, et ükski mudel ei anna täiesti reaalselt ülevaadet tegelikkusest ja kontseptuaalsete mudelite viga võib olla suur.

Hüdrogeoloogiline kontseptuaalne mudel

Hüdrogeoloogias on kontseptuaalsed mudelid ühed enim komplitseeritud töövahendid, kuna mudeli ja reaalsuse erinevus võib olla suur. Oluliseks erinevuseks fundamentaalsest mudelist on see, et mudelitele antakse ruumiline kuju, millele lisatakse hüdrogeoloogilised elemendid (Spijker et al 2010). Mudeli koostamiseks kasutatakse geoloogilist ja hüdrogeoloogilist informatsiooni, mis on kogutud kasutades veetasemete mõõtmist, puuraukude konstruktsioone ja vee keemilise koostise analüüsi, kuid kasutatakse üldiseid geoloogilisi teadmisi või oletusi, mis võib kaasa tuua suure mudeli määramatuse (Enemark et al 2019). Hüdrogeoloogiline mudel pole kunagi iseseisev, vaid on alati üks osa suurest süsteemist, mida mõjutavad tsüklilised või evolutsioonilised protsessid ning mudelit esitatakse tavaliselt hüdrogeoloogilise skeemina, mida saab kasutada järgnevate keerukamate mudelite koostamisel (Spijker et al 2010).

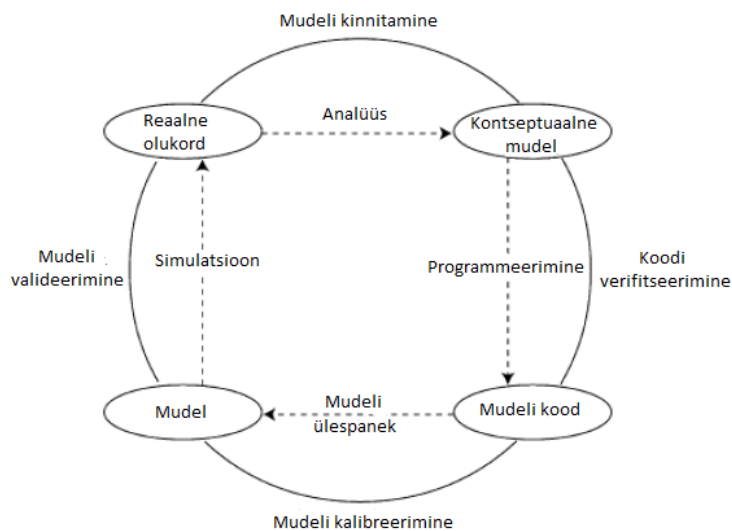
Mudelid erinevatele huvigruppidele

Mõnikord on vaja esitada hüdrogeoloogilisi probleeme või objekte arusaadavalt eri valdkonna teadlastele, poliitikutele või kohalikele inimestele. Spetsialistide omavahelised informatsioonivahetuse mudelid on üldjuhul palju detailsemad kui mudelid, mida tutvustatakse huvirühmadele. Selliste mudelite eripäraks on suur lihtsustus ning mudeliandmestiku pärinemine eri valdkondadest. Seega võivad kontseptuaalsed mudelid olla oluliseks ühenduseks erinevate huvigruppide vahel, mis annavad aimu teadmiste piiratusest või paradigma erinevustest (Spijker et al 2010).

2.1.2 Kontseptuaalse mudeli ülesehitamine

Kontseptuaalse mudeli ülesehitamise ülesanded jagatakse kahte suuremasse gruppi. Esimeseks etapiks on algne piiritlemine ehk mudeli ülesehitamine, mis algab probleemi püstitamisest. Seejärel piiritletakse uuringuala kasutades geoloogilist ja hüdrogeoloogilist andmestikku, pinna- ja põhjaveeproove ja luuakse esialgne visioon uuringuala hüdrogeoloogilisest seisundist. Kasutades puurkaevude veetasemete andmeid, saab hüdraulilise materjali alusel defineerida hüdrogeoloogilised kihid, mis kannavad vett, on vett

läbi laskvad või on küllastumata (European Communities 2010). Järgnevalt tuleb kirjeldada ning anda kvantitatiivsed ülevaated hüdraulilistele, geokeemilistele ja hüdrokeemilistele parameetritele ning kirjeldada olulisemad küllastumata kihi parameetrid, maapinna kasutus ja piikonnad, mis võivad mudelis probleeme tekitada. Viimaks võib kaotada mudeli staatilisuse ja muuta see tsükliliseks, et seda saaks uuesti ja uuesti katsetada, muutes vahepeal parameetreid või lisades neid juurde (Joonis 1), kuid siis pole enam tegemist kontseptuaalse, vaid komplektse numbrilise mudeliga (European Communities 2010).



Joonis 1. Kontseptuaalse mudeli tsükliline parendamise skeem (Refsgaard ja Henriksen 2004 järgi).

2.1.3 Kontseptuaalse mudeli visualiseerimine

Kontseptuaalse mudeli ülesehituse keerukusest oleneb samuti mudeli visualiseerimise kompleksus, mis sõltub mudeli suunatuse eesmärgist. Visualiseeritud pilt võib olla nii kahe- kui ka kolmedimensiooniline või lihtsalt läbilõikena esitatud (European Communities 2010). Kujutatud peaksid olema küllastunud ja küllastumata veekihid, veepidemed ja vett läbi laskvad kihid, surve- ja surveta veekihid, veevoolu suund ja kivimikihtide litoloogia. Lisades juurde hüdroloogilised parameetrid (sademed, põhjavee juurdevool ja pinnavee omadused), saab ülevaate kontseptuaalsest mudelist (European Communities 2010).

2.2 Virumaa fosforiidimaardla geokeemiline taust ja probleemid

2.2.1 Fosforiit

Maailma rahvastiku kasv koos suurenenud nõudlusega toidu järele, on oluliselt laiendanud ekstensiivse põllumajanduse levikut. Ekstensiivse põllumajanduse üks tunnuseid on rohke mineraalväetiste kasutamine, et kompenseerida toitainete väljakannet haritavalt maalt (Mogollon et al 2018). Taimebiomassi kasvu oluliseks piirajaks on fosforipuudus, mis saab samuti kompenseeritud mineraalväetiste kasutamisega. Aastaks 2050 ennustatakse fosforivajadust 22–27 Tg P/a, mis on 51-86% suurenemine võrreldes 2005. aastaga (Mogollon et al 2018). Ulatuslik fosfaatväetiste tootmine on ammendanud või ammendamas lihtsalt kasutatavaid fosfaadimaardlaid ning passiivsed fosfori varud on muutumas perspektiivseteks varudeks. Üheks selliseks perspektiivseks fosfori maardlaks on kujunemas Eesti Ordoviitsiumi ladestu liivakivis leiduv fosfaatne materjal.

Eestis leiduv fosforiit on geoloogiliselt Kambriumi ja Ordoviitsiumi aegsete settekivimite piiril paiknev kvartsliaakivi, mis sisaldab settimise ajal sinna kuhjunud käsijalgsete loomade fosfaatsest materjalist kodasid. Kodades sisalduv fluorkarbonaatapatiit on kvartsliaakivast tihedam ja tänu tekkeagele lainetusele on nüüdseks kuhjunud kojarikasteks kvartsliaakivideks. Põhja-Eestis on viis leiukohta, kus fosforiit vastab maardla nõudmistele (kihi paksus on vähemalt 1-1,5 m ja P_2O_5 sisaldus üle 3%) ning neist on fosforiidirikkam lõunapoolsem Rakvere maardla, kuid tähelepanu on ka põhjapoolisel Toolse maardlal, kuna seal on parimad tingimused katsekaevandamiseks (Pirrus 2000). Toolse maardlal on geoloogiliselt sarnased tingimused nüüdseks ammendunud Maardu fosforiidikarjääriga – mõlema maardla fosforiidikihti katab 1-2 m paksune graptoliitargilliidikiht.

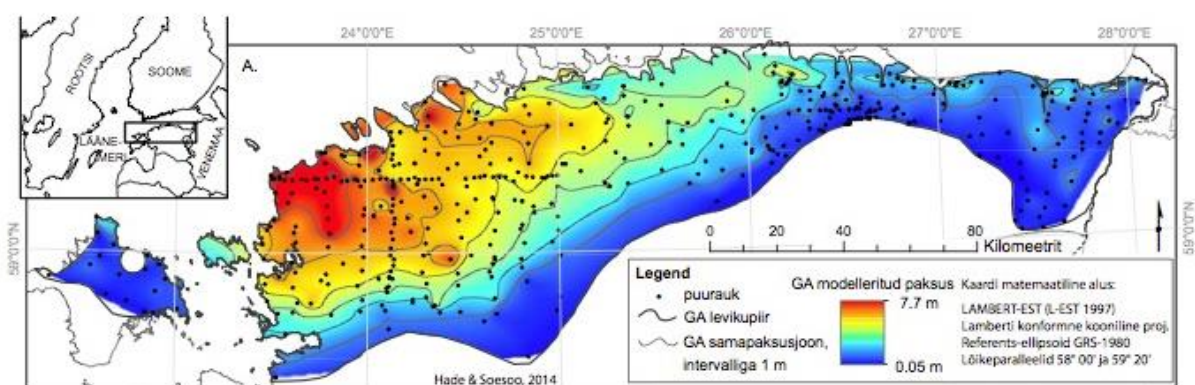
Fosforiidis olevaid raskmetalle pole palju uuritud (Hade et al 2017), kuid on teada, et püriidisisaldus jääb 0,2 ja 1,3% vahele (Tabel 1), kohati tõustes 2%-ni. (Vallner & Perens 1997; Petersell et al 1997). Hinnangud fosforiidis leiduvate raskmetallide (uraan, plii, mangaan, strontsium) sisaldustest on erinevates allikates väga varieeruvad, kuid üldiselt on arvatud, et nende kogused on üsna marginaalsed (nt uraan 22 ppm) (Petersell et al 1997).

Tabel 1. Fosforiidi keemiline koostis Kabala uuringuala puuraukudes (Jüri Nemliheri eraarhiivist 2019).

Puurauk	P ₂ O ₅	MgO	Fe ₂ O ₃	FeS ₂	Lahustumatu jääk	CaO	kokku
	Wt%						
P-2252	8,4	3,2	2,1	0,3	48,2	20,3	82,5
P-2203	11,5	1,8	1,2	0,2	54,9	20,7	90,3
P-2177	18,1	0,4	1,0	0,4	48,0	26,3	94,3
P-2148A	8,2	1,6	1,2	0,2	65,8	14,6	91,6
P-2060	13,1	1,3	1,3	0,4	54,4	21,8	92,2

2.2.2 Graptoliitargilliit

Maardu ja Toolse fosforiidikihti katab Alam-Ordoviitsiumi aegne Türisalu kihistu musta värvi graptoliitargilliit ning sama ajastu savid, glaukoniitliivakivi, lubjakivi, dolomiit ja kvaternaari setted. Graptoliitargilliit on orgaanilist ainet sisaldav kõvastunud savikivim. Kivim levib katkematu kihina Põhja-Eestis, selle paksus võib ulatuda paarikümnest sentimeetrist idaosas kuni 6-7 meetrini lääne pool (Joonis 2). Orgaanilise aine sisaldus on vaid 12-17%, mistõttu ei kasutata seda põlevkivienergeetikas (Pirrus 2000). Lisaks on graptoliitargilliidis kõrge püriidi ehk raudsulfidi (4-6 %) ning kõrgendatud raskmetallide sisaldus (U, Mo, V, Pb, Co jt) (Petersell et al 1991). Kuigi ida pool on kiht õhem, on raskmetallide kontsentratsioonid seal suuremad. Suurimad uraani sisaldused Kunda ürgoru läheduses võivad olla kuni 1000 ppm, molübdeenil kuni 2000 ppm ja vanaadiumil kuni 3000 ppm (Hade et al 2017).

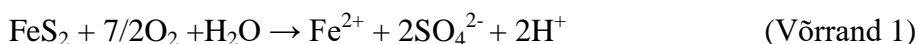


Joonis 2. Graptoliitargilliidi levik ja kihi paksus (Hade ja Soesoo 2014).

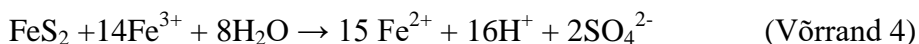
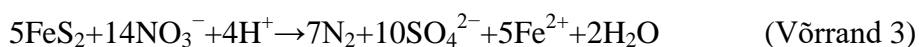
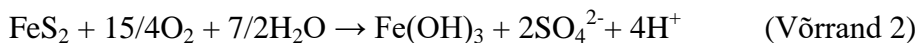
2.2.3 Püriidi oksüdatsioon

Graptoliitargilliidis ja vähesel määral fosforiidis leviv püriit ei ole iseenesest ohtlik, kuid võib osutada katalüsaatoriks keskkonda saastavatele protsessidele. Suurimaks kaevanduste keskkonnaprobleemiks põhjavee tasemete alandamise kõrval on püriidi oksüdatsioon, mis põhjustab happeliste kaevandusvete teket, mille tagajärjel võivad keskkonda vabaneda toksilised elemendid (näiteks arseen) (Appelo & Postma 2005).

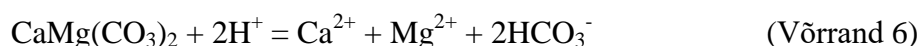
Püriit (FeS_2) on üks enimlevinuid sulfiidseid mineraale, mida sisaldavad paljud setendid, Eestis näiteks lubjakivi, dolomiit, põlevkivid ja fosforiit. Püriidi oksüdatsiooni kontrollivad hapniku ja vee ligipääs sulfiidmineraalile (Marandi et al 2019). Maapõues, allpool põhjaveetasel, kus õhuhapnikul ligipääsu pole, oleneb püriidi oksüdeerumine vees lahustunud hapniku sisaldusest, mis seab piirangud oksüdatsiooniprotsessidele. Samas kokkupuude vaid atmosfäärse hapnikuga ei põhjusta märkimisväärset püriidi oksüdeerumist – intensiivseks püriidi oksüdatsiooniks on vajalik ka vaba vee juuresolu (Võrrand 1). Püriidi oksüdeerumise kiirust mõjutavad ka keskkonna pH ja mikrobioloogiline aktiivsus. Bakteriaalne aktiivsus võib oluliselt kiirendada oksüdatiivseid protsesse võrreldes puhtalt anorgaanilises keskkonnas toimuvate geokeemiliste protsessidega (Pisapia et al 2007). Püriidi oksüdeerumise kiirus on kontrollitud kivimi eripinnaga ehk mida suurem on eripind, seda rohkem puutub kivimis olev püriit kokku vee ja hapnikuga ning seda kiirem on oksüdeerumise protsess (Heidel et al 2009). Püriidi oksüdeerumise lõpp-produktideks on Fe^{2+} ja SO_4^{2-} ioonid ja vabad prootonid, mis põhjustavad kaevandusvete madalat pH-d (Puura 1998).



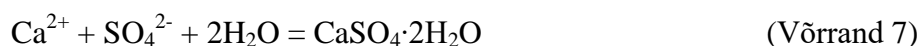
Nii laborieksperimendid kui vaatlusandmed looduses on näidanud, et püriidi oksüdatsioon võib toimuda ka redokstundlike elementide nagu NO_3^- (Võrrand 3) ja Fe^{3+} (Võrrand 4) vahendusel (Bottrell & Tranter 2002). Redoksreaktsioonidele on iseloomulik kulgemine kindlas järjekorras, sõltuvalt reaktsiooni energeetilisest bilansist.



Eesti põlevkivikaevanduste näitel ei ole Eestis happeliste kaevandusvetega suuri probleeme (Erg 2005). Põlevkivikaevanduste veed on neutraalse pH-ga, kuid sulfaadirikkad ning suure karedusega. See on tingitud Eesti aluspõhja kivimitest, eelkõige palju karbonaatmineraale sisaldavast lubja- ja dolokivist. Põlevkivi kihid on settinud vaheldumisi karbonaatsete kivimikihtidega ning püriidi leostumisel tekkiv happeline kaevandusvesi puhverdatakse neutraalsemaks lubjakivide koostises olevate karbonaatidega (Erg 2005). Viimane võib toimuda koos nii kaltsiidiga (Võrrand 5) kui ka dolomiidiga (Võrrand 6).



Eelnevalt püriidi oksüdatsioonist vabanenud sulfaatioonid reageerivad üleküllastumise korral vabade Ca^{2+} ionidega, mis põhjustab kipsitumist ning tasakaalustab vees sisalduvate sulfaatide hulka.



3. Ordoviitsium-Kambriumi põhjaveekiht

3.1 Paiknemine

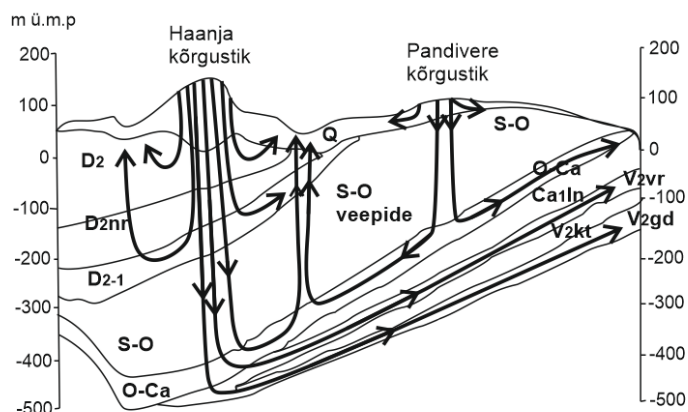
Geograafiliselt asub Ordoviitsium-Kambriumi veekiht Balti Arteesiabasseini (Fanerosoikumi settebassein, mis katab Baltimaid ja osa Poolast) põhjaosas. Ordoviitsium-Kambriumi (O-Ca) põhjaveekiht jääb geoloogiliselt lamava Kambrium-Vendi ja lasuva Siluri-Ordoviitsiumi veekomplekside vahele, mida eraldavad Siluri-Ordoviitsiumi ja Lükati-Lontova regionaalsed veepidemed. Stratigraafiliselt asub O-Ca põhjaveekiht Ordoviitsiumi ja Kambriumi ladestute piiril (Vallner & Perens 1997). Veekihi piir on põhjas piiritletud Kambriumi ladestu Tiskre või Kallavere kihistu avamusjoonega, idas jätkub veekiht Venemaal, läänes ulatub veekiht Läänemere alla. Lõunas muutub Kambriumi-Vendi ja O-Ca põhjaveekihte lahutav Lontova veepide üha õhemaks ning liivasemaks ning Läti territooriumil on need põhjaveekihid praktiliselt ühinenud Kambriumi veekihiks, mis levib üle kogu basseini.

3.2 Geoloogiline ehitus

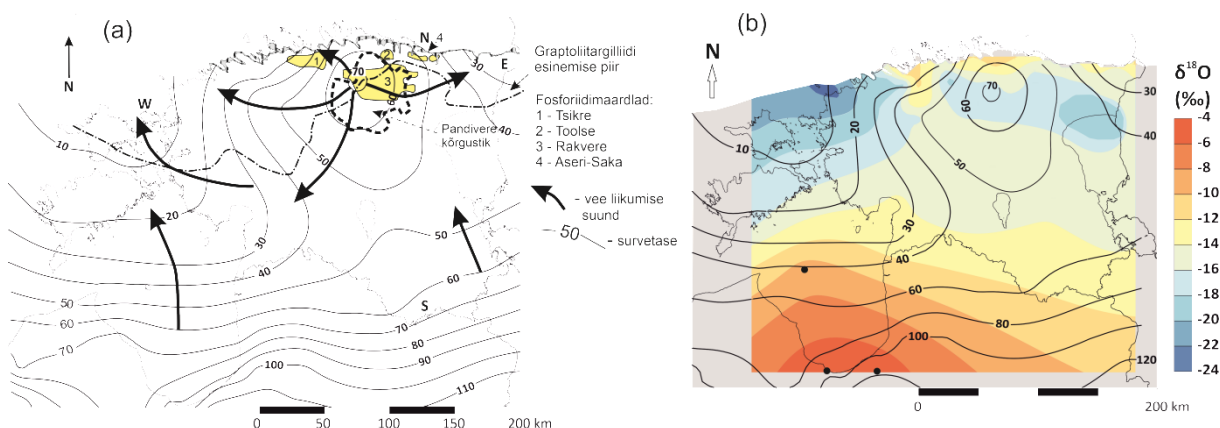
Levila põhjaosas on O-Ca põhjaveekiht kaetud Alam-Ordoviitsiumi Türisalu kihistu tumepruuni graptoliitargilliidiga, mis lääne pool asenduvad Varangu, Leetse ja Toila kihistu savide, glaukoniidirikka liivakivi ja tiheda dolomiitlubjakiviga, mis on ka veekihi lasuvaks veepidemeks. Ida-Eestis lasub graptoliitargilliidil Leetse kihistu tumehall glaukoniitne liivakivi või Toila kihistu savikate vahekihtidega dolomiitne glaukoniitlubjakivi. Veepideme paksus suureneb lõuna suunal, olles Põhja-Eestis 8-10 m. Veekiht koosneb Ülem-Kambriumi-Alam-Ordoviitsiumi Kallavere kihistu heledast kvartslüivakivist ja Alam-Kambriumi Tiskre kihistu heledast aleuroliitsest ja peeneteralisest kvartslüivakivist (Perens et al 2012). Hele kvartslüiva kiht sisaldab paiguti käsijalgsete loomade fosfaatsest materjalist kodasid, mis on nüüdseks moodustanud fosforirikkad kvartslüivaläätsed, mida tuntakse Eesti fosforiidina (Pirrus 2000).

3.3 Põhjavee päritolu ja hüdrodünaamika

Pikka aega valitses kontseptuaalne arusaam, et O-Ca põhjaveekiht toitub olulisel määral läbi Pandivere kõrgustiku, kust põhjavesi voolab radiaalselt laiali (Joonis 3 ja 4a). Selleks andis alust O-Ca veekihi hüdrostaatilise rõhu vähenemine Pandivere kõrgustiku äärealade suunas. Seevastu Pärn et al (2016) näitas, et $\delta^{18}\text{O}$ väärtused O-Ca veekihis (-14 kuni -22,5 ‰) ei vasta tänapäevaste põhjavete isotoopkoostisele (-11 kuni -12,5‰; Raidla et al 2016), vaid on tunduvalt negatiivsemad (Joonis 4). Veekihi enamasti puudub aktiivne veevahetus pealmiste põhjaveekihtidega ning pigem on tegemist nn paleo-põhjaveega. Vettandvate kivimite lateraalne filtratsioonikoefitsient O-Ca veekihis on üldiselt vahemikus 0,5–3 m/d ning põhjaveekihi veejuhtivus varieerub 20-50 m²/d, olles üks madalamaid Eestis (Vallner & Perens 1997). Sel põhjusel Pandiverest lähtuv põhjavee uuenemine küll toimub, kuid on siiski äärmiselt aeglane.



Joonis 3. Eesti põhjaveekihtide toitumise kontseptuaalne skeem (Vallner & Perens 1997 järgi), mis eeldas O-Ca põhjavee aktiivset veevahetust läbi Pandivere kõrgustiku.



Joonis 4. Graptoliitargiliidi ja fosforiidimaardlate paiknemine ning O-Ca põhjavee liikumise suunad (a) ja $\delta^{18}\text{O}$ väärtused O-Ca veekihis (b) (Pärn et al 2016, 2018 järgi)

Ordoviitsium-Kambriumi veekihi põhjavesi on enamasti kujunenud mandriliustike sulavetest tekkinud põhjavee ja lõunapoolse relikitse Na-Cl tüüpi süngeneetilise mineraalvee segunemisel, mida on kohati magestanud tänapäevaste sademete infiltreerumisel tekkinud põhjavesi (Pärn et al 2016). Enam kui 10 000 aastat tagasi oli Eesti ala kaetud 1-2 km paksuse mandriliustikuga (Björck 1995; Clason et al 2014). Mandriliustiku all tekkis hüdrauliline rõhk, mis oli piisavalt suur, et suruda liustiku alla kogunenud sulaveed Eesti aluspõhja kivimitesse. Pärast liustiku taandumist ja kliima soojenedes täitusid maapinnalähedased veekihiid taas sademetest tekkinud põhjaveega (Sterckx et al 2018). Tunduvalt soojemates tingimustes tekkinud põhjavesi ei jõudnud aga sügavamatesse põhjaveekihtidesse nagu O-Ca, kus veevahetus on väga aeglane ning seal säilisid suurel hulgal liustiku sulavetest pärinevad põhjaveed (Pärn et al 2016).

3.4 Keemiline koostis

O-Ca põhjavee keemiline koostis on väga varieeruv ning sõltub otseselt veevahetuse tingimustest ja vettandvate kivimite lasumussügavusest. Põhja-Eesti ranniku lähedal, kus lasuvate Ordoviitsiumi ladestu kivimite paksus on väike, domineerib $\text{HCO}_3\text{-Mg-Ca}$ või $\text{HCO}_3\text{-Ca-Mg}$ tüüpi põhjavesi, mille mineraalsus jääb vahemikku 0,3-0,5 g/l. Põhjavee vanusemäärangute järgi on tegemist tänapäevast päritolu põhjaveega (Pärn et al 2019). Tänapäevase Ca- HCO_3 tüüpi põhjavee levik on laiem ka ürgorgude piirkonnas (nt. Purtse Kunda, Vasavere ürgorg). Rannikust eemal hakkab domineerima liustikulist päritolu Na- HCO_3 tüüpi põhjavesi mineraalsusega 0,3-0,6 mg/l (Pärn et al 2016). O-Ca põhjaveekihi lõunaosas levib aga riimveeline Na-Cl tüüpi põhjavesi mineraalsusega 1,5-4 g/l (Perens et al 2012; Pärn et al 2016), mis on kujunenud jääaegade eel veekompleksi täitnud soolase merelist päritolu põhjavee ja liustikutekkelise põhjavee segunemisel (Pärn et al 2016, 2019; Gerber et al 2017).

Kõige olulisemad geokeemilised protsessid, mis on mõjutanud põhjavee keemilise koostise kujunemist vastasmõjus kivimiga, on karbonaatsete mineraalide (dolomiit, kaltsiit) lahustumine, katioonvahetus, püriidi oksüdatsioon ja orgaanilise aine oksüdeerumine (Pärn et al 2016, 2018). Kui karbonaatmineraalide lahustumine on domineeriv protsess rannikualal noores põhjavees, siis katioonvahetus ilmneb enam liustikutekkelises Na- HCO_3 tüüpi põhjavees (Pärn et al 2016).

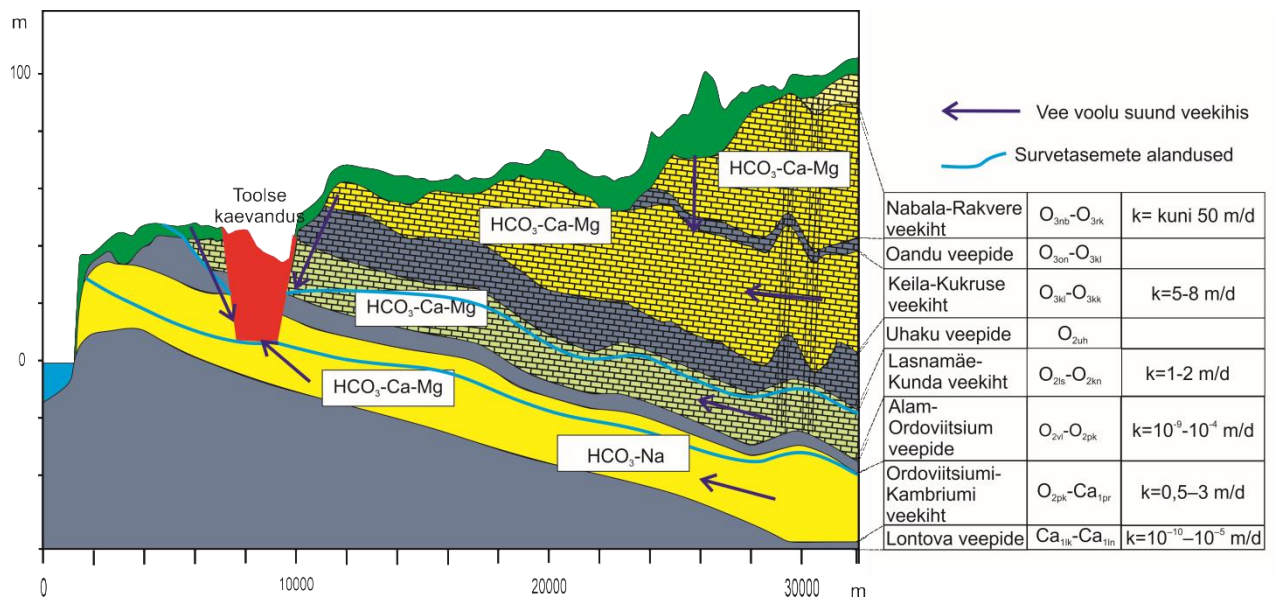
4. O-Ca põhjaveekiht kaevandusega Toolse fosforiidimaardlas

4.1 Mudeli ala kirjeldus

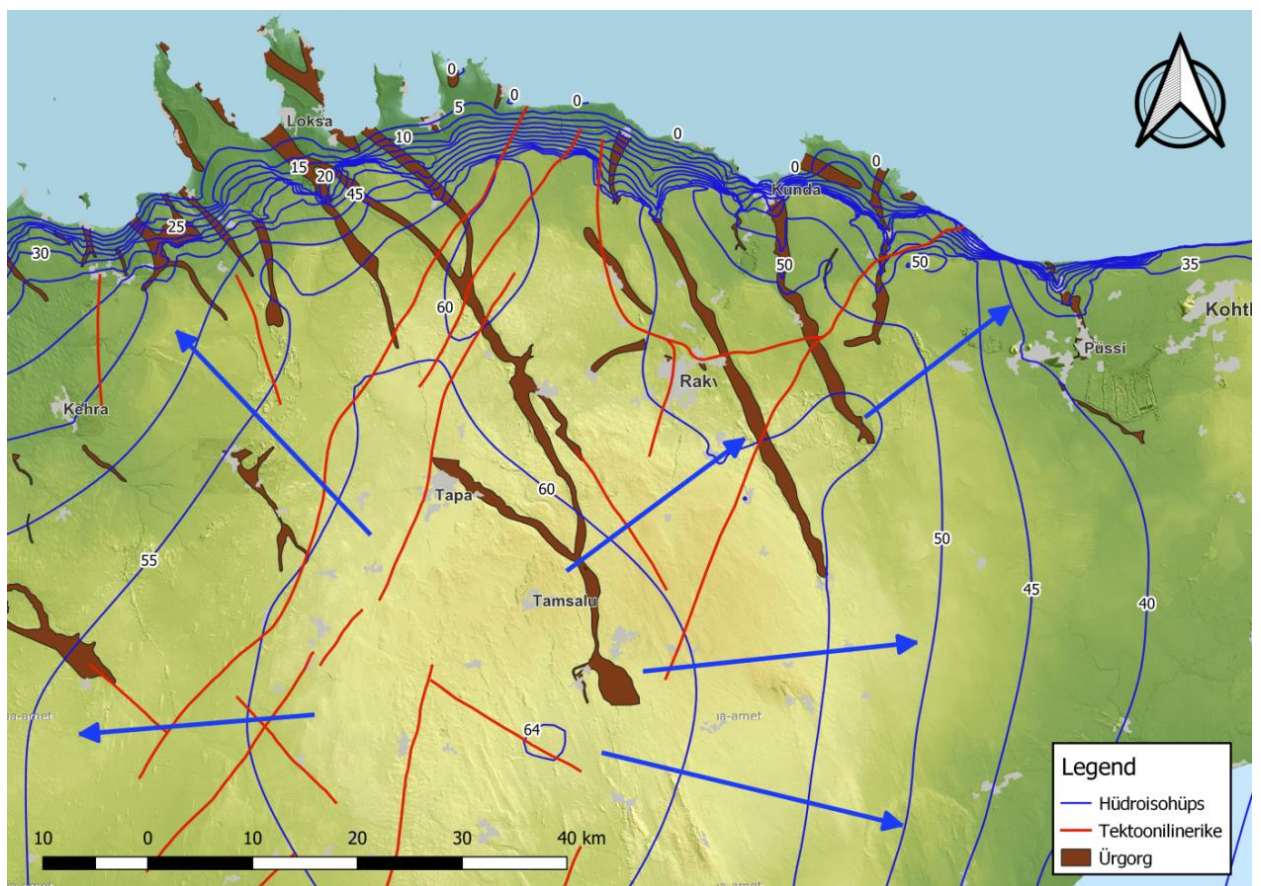
Fosforiidi uuringute käigus on välja eraldatud põhjapoolne Toolse maardla ja lõunapoolne Rakvere maardla koos Kabala kaeveväljaga. Toolse maardlas on maarde rikastusprotsent küll madalam kui lõuna pool, kuid tänu märksa madalamale lasumussügavusele (10-40 m; Pirrus 2000) saaks seal kaevandada ka avatud karjääri meetodil, mis võimaldaks fosforiiti Toolse maardlast lihtsamalt ja odavamalt maapinnale väljata kui lõunapoolses maardlas. Ka kujunev põhjavee survetaseme depressioonilehter oleks Toolse maardla puhul väiksem kui lõunapoolses Kabala maardlas (Joonis 7). Oluliseks probleemiks Toolse maardla kasutusse võtmisel on fosforiidikihil lasuv 1-2 m paksune graptoliitargilliidi kiht. Graptoliitargilliidil lasub glaukoniitne liivakivi ja dolomiitne glaukoniitlubjakivi, mida katavad Kvaternaari setted (Joonis 5). Ala läbivad mitmed ürgorud (Kunda ja Selja), mis kohati lõikavad läbi ka O-Ca veekihti katva Alam-Ordoviitsiumi veepideme, avades seeläbi pindmistele vetele lokaalsed võimalused sissetungiks muidu suhteliselt hästi isoleeritud põhjaveekihti (Jõelet & Polikarpus 2019).

4.2 Kaevanduse mõju põhjavee-survetasemetele

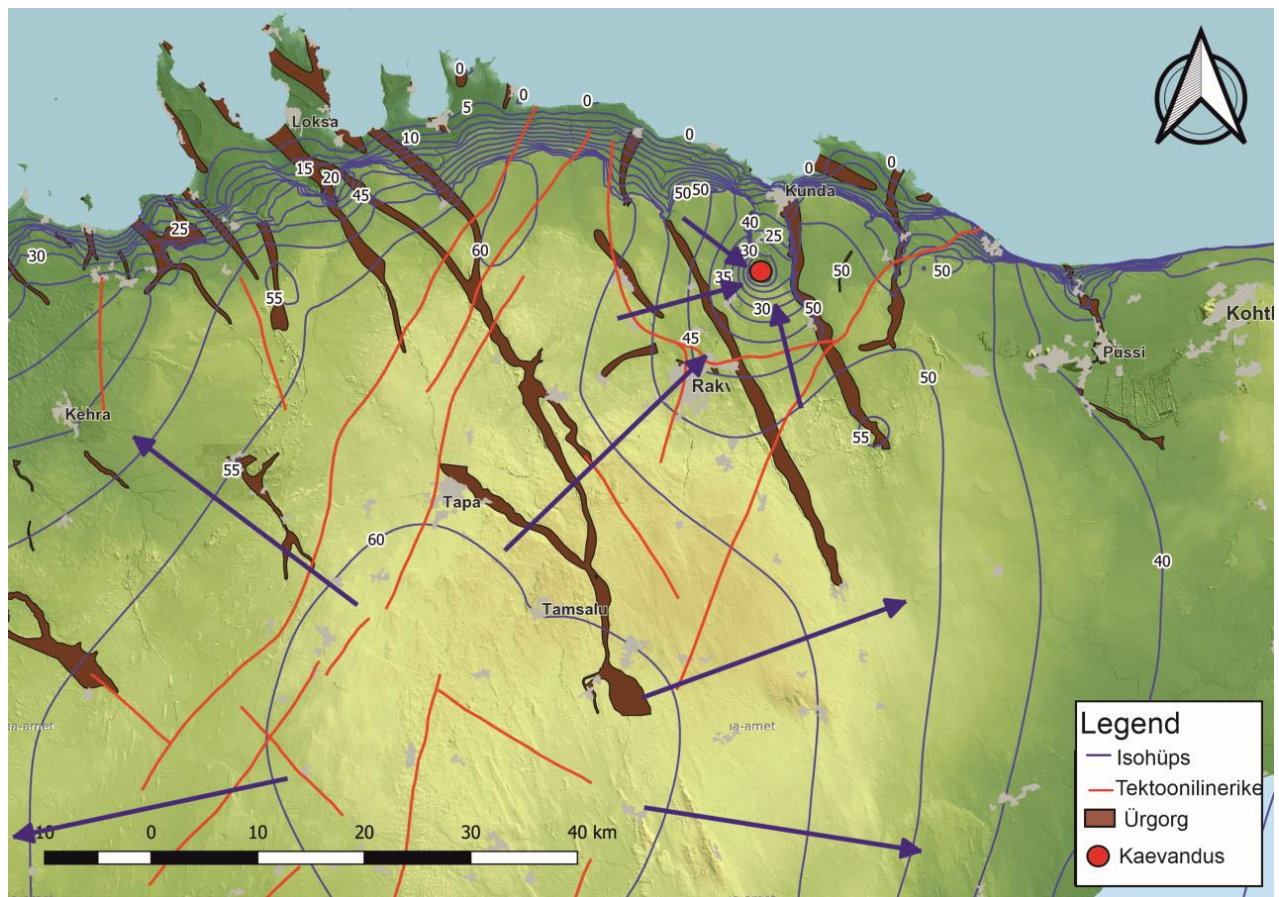
Ordoviitsium-Kambriumi veekihis on loomulik vee liikumine Pandivere kõrgustikult kui toitealalt radiaalselt kõrgustiku servaalade suunas, jälgides survetasemete alanemist. Toolse maardla piirkonnas, Kunda ürgoru läheduses, on O-Ca veekihis looduslik survetase 47-52 m ü.m.p (Joonis 6). Avakaevanduse rajamine tekitaks Toolse maardlasse O-Ca veekihti kuni 50 m survetaseme alanduse (Joonis 7). Lisaks ulatuslikule depressioonilehtrile lääne suunas, tekib väga suur survetasemete gradient ida pool, kus tekkiva lehtri katkestab O-Ca veekihini lõikuv Kunda jõe ürgorg, mis võib kaasa tuua märkimisväärse hulga hapnikurikka vee juurdevoolu kaevandusse. Põhja pool lõppeb depressioonilehter Kallavere avamusega (Jõelet & Polikarpus 2019). Avatud kaevanduse korral on depressioonilehter veelgi ulatuslikum, kuna vesi tuleb ära juhtida ka pealmistest põhjaveekihtidest. Veevoolu suunad jäävad kaevanduse rajamisel sarnaseks looduslikule, kuid suurenev hüdrodünaamiliste rõhkude gradient võib tekitada kiirema voolu Pandivere kõrgustikult kaevanduspiirkonna suunas, kuid kuna O-Ca põhjaveekihiil on veejuhtivus vaid 20-50 m²/d, (Vallner & Perens 1997), siis vee juurdevool on aeglane ja ulatuslikku hapnikurikkama vee juurdevoolu ei teki.



Joonis 5. Põhjavee voolu suunad ja survetasemete alandused O-Ca veekihi Toolse kaevanduse rajamisel. Läbilõige Kundast Viru-Jaagupini.



Joonis 6. Looduslikud survetasemed ja põhjavee liikumise suunad O-Ca veekihi (Jõelett & Polikarpus 2019 järgi).



Joonis 7. Survetasemed ja põhjavee liikumise suunad Toolse kaevanduse rajamisel O-Ca veekihi (Jõelet & Polikarpus 2019 järgi).

4.3 Kaevanduse mõju põhjavee keemilisele koostisele

Avatud karjääri kui odavama maavara ammutamise viisi rajamisel peab kõik fosforiiti katvad kivimikihid eemaldama. Karjääri avamisel Toolse maardlasse tuleb arvestada fosforiiti katva 1-2 m paksuse graptoliitargilliidi kihiga, mis on põhjustanud keskkonnaprobleeme Maardu fosforiidikaevanduse aladel (Pärn et al 2017). Ka suletud kaevanduse puhul tuleb arvestada võimalusega, et kaevandustegevus soodustab oluliselt põhjavee läbivoolu graptoliitargilliidi kihist ning ilmnevad analoogsed probleemid nagu Maardu karjäärides.

Ladestades graptoliitargilliidi maa peale, puutub see kokku õhuhapnikuga ja sademeveega, mis põhjustab püriidi ja orgaanika oksüdatsiooni ning vee hapestumise. Lisaks on graptoliitargilliidis sulfiidsete mineraalide ja orgaanikaga seotud raskmetalle (Toolse piirkonnas eelkõige uraan, vanaadium ja molübdeen) (Hade et al 2017). Kuna metallide lahustuvus kasvab keskkonna pH langusega (Appelo & Postma 2005), siis happelise vee tekkimisel

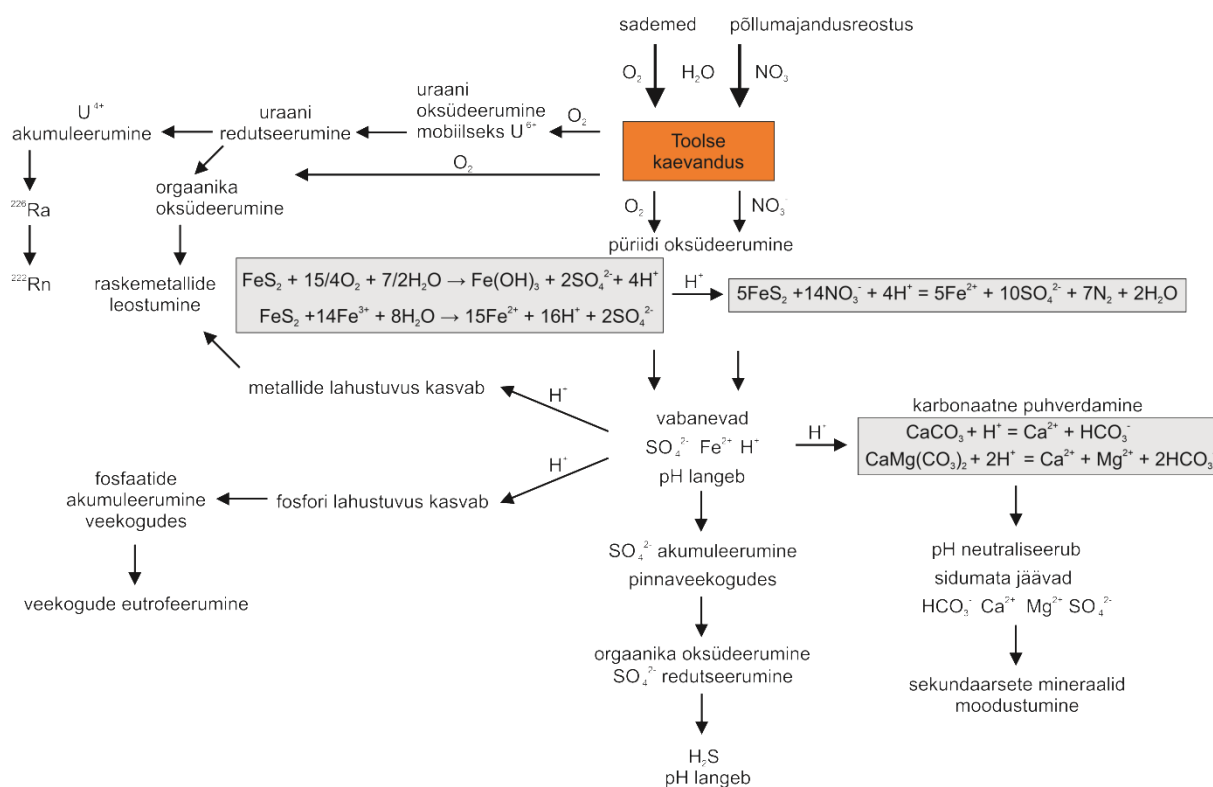
võivad erinevad raskmetallid vees muutuda mobiilseks ning sattuda läbi kaevanduse liigveeärástussüsteemide pinnaveekogudesse ja ülemistesse põhjaveekihtidesse. Püriit võib oksüdeeruda ka põllumajandusest pärit nitraatide vahendusel (Võrrand 3) ning see võib viia veelgi suurema hulga sulfaatide ja Fe^{2+} ioonide vabanemiseni (Joonis 8).

Väga oluline on aheraine maapinnale ladestamise tehnoloogia – vale ladestamine võib kaasa tuua aheraine iseenesliku süttimise, kui püriidi oksüdeerumisel tõuseb temperatuur. See võib lisaks soodustada raskmetallide vabanemist keskkonda. Efektiivsem ladestamine võib ennetada ja leevendada paljusid keskkonnaprobleeme, mis graptoliitargiliidi oksüdeerumisega võivad ilmnedá. Maardus läbi viidud uuringud (Puura 1998; Pärn et al 2017) näitasid, et selektiivsel ladestamisel (graptoliitargiliidi kihid ladustati Kvaternaari setete ja lubjakivi kihtide vahele) on püriidi oksüdeerumine intensiivsem ning keskkonnamõjud on suuremad ja pikaajalisemad kui aheraine kuhjades, kus graptoliitargiliidi ja lubjakivi kihid on ladestatud segamini. Ladestamisel on tähtis, et graptoliitargiliit isoleeritaks võimalikult kiiresti ja kokkupuude õhuhapnikuga oleks minimaalne. Siis väheneb oht happelise vee tekkeks ja raskmetallide mobiliseerumiseks. Sellised lahendused on näiteks aheraine isoleerimine savikihiga või eraldamine vaheldumisi jäme- ja peenteraliste liivadega, mis samuti takistab õhuhapnikku levimist ladestatud graptoliitargiliidini (Puura 1998). Karbonaatne puhverdamine küll neutraliseerib pH-d, kuid siiski jäävad sidumata vabad sulfaatioonid ja graptoliitargiliidist leostunud sulfiididega seotud raskmetallid, mis mõjutavad põhjavee keemilist koostist ning võivad kanduda mööda veekihte edasi (Joonis 8). Sulfaatioonid võivad moodustada sidumata Ca^{2+} - ja Mg^{2+} -ioonidega sekundaarseid mineraale (nt kips) ning settida (Hade et al 2017).

Sidumata jäävad sulfaadid võivad liikuda pinnaveekogudesse ning seal akumulēeruda, moodustades orgaanika- ja sulfaatiderikka muda. Kui veekogudes olevad tingimused muutuvad redutseeruvateks (orgaanika oksüdeerumine ehk hapnik tarbitakse ära), algab sulfaatide redutseerumine, mis võib viia toksilise divesiniksulfiidi (H_2S) tekkeni. See omakorda langetab ka veekogu pH-d ja muudab sealsed elutingimused organismidele ebasoodsaks (Joonis 8). Mõningates Maardu karjääri territooriumi pinnaveekogudes on täheldatud eelkirjeldatud protsesse (Pärn et al 2017).

Hapnikurikkama vee kokkupuude ladestatud graptoliitargiliidiga või sissevool läbi Kunda ürgoru O-Ca veekihti võib soodustada uraani migreerumist. Uraan esineb neljas

oksüdatsiooniastmes (U^{3+} , U^{4+} , U^{5+} , U^{6+}), nendest stabiilsemad on U^{4+} (redutseerivates tingimustes) ja U^{6+} (oksüdeerivates tingimustes). Kui U^{4+} on kergesti sadestuv (Vogel et al 1999), siis iooni oksüdeerumisel moodustuv UO_2^{2+} (uranüülioon) on hästi lahustuv ja muudab uraani liikuvaks. Kuna O-Ca veekihi toimub aeglane veevahetus, on sealsed tingimused redutseerivad ning uraan esineb sadenenud vormis. Kui veekihti hakkab lisanduma hapnikurikkamat vett, võib uraan muutuda mobiiliseks. Oksüdeerunud uraani sattumisel hapnikuvaesesse keskkonda (pinnaveekogu setted, vee tagasi suunamisel põhjaveekihti), uraan redutseerub ning settib taas. Akumuleeruv uraan võib kaasa tuua lokaalseid kiirgustasemete tõuse läbi tütarelementide (^{226}Ra ja ^{222}Rn), mida on hinnatud terviseriskiks (Mays et al 1985)

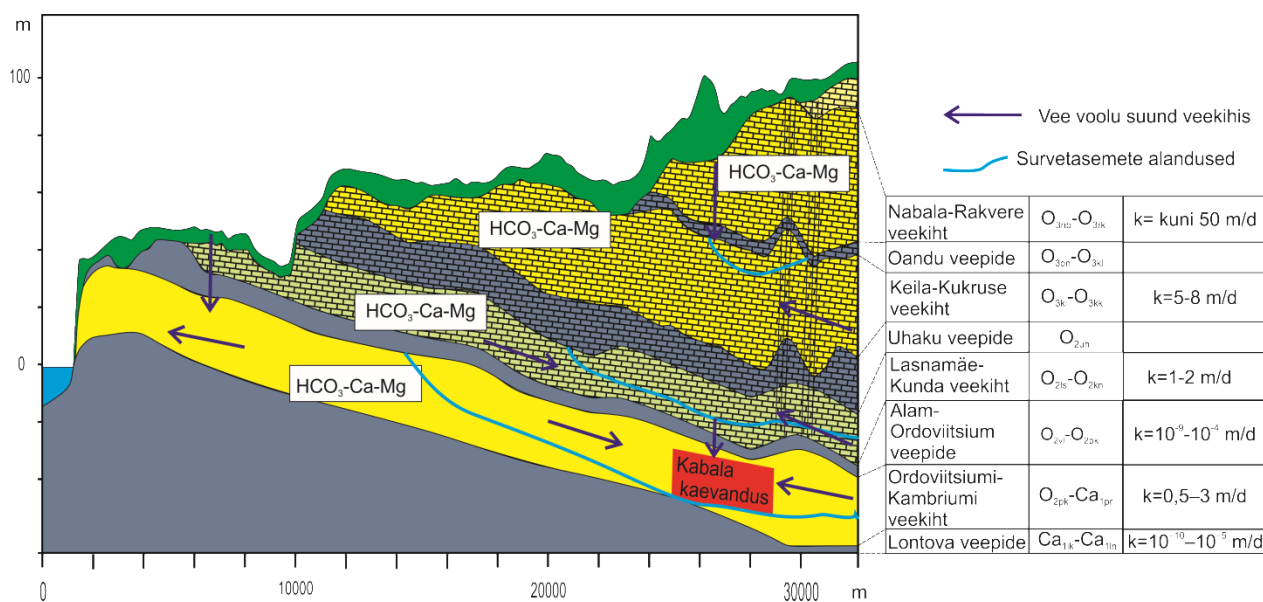


Joonis 8. O-Ca põhjavee keemilised muutused Toolse kaevanduse piirkonnas.

5. O-Ca põhjaveekiht kaevandusega Rakvere fosforiidimaardlas

5.1 Mudeli ala kirjeldus

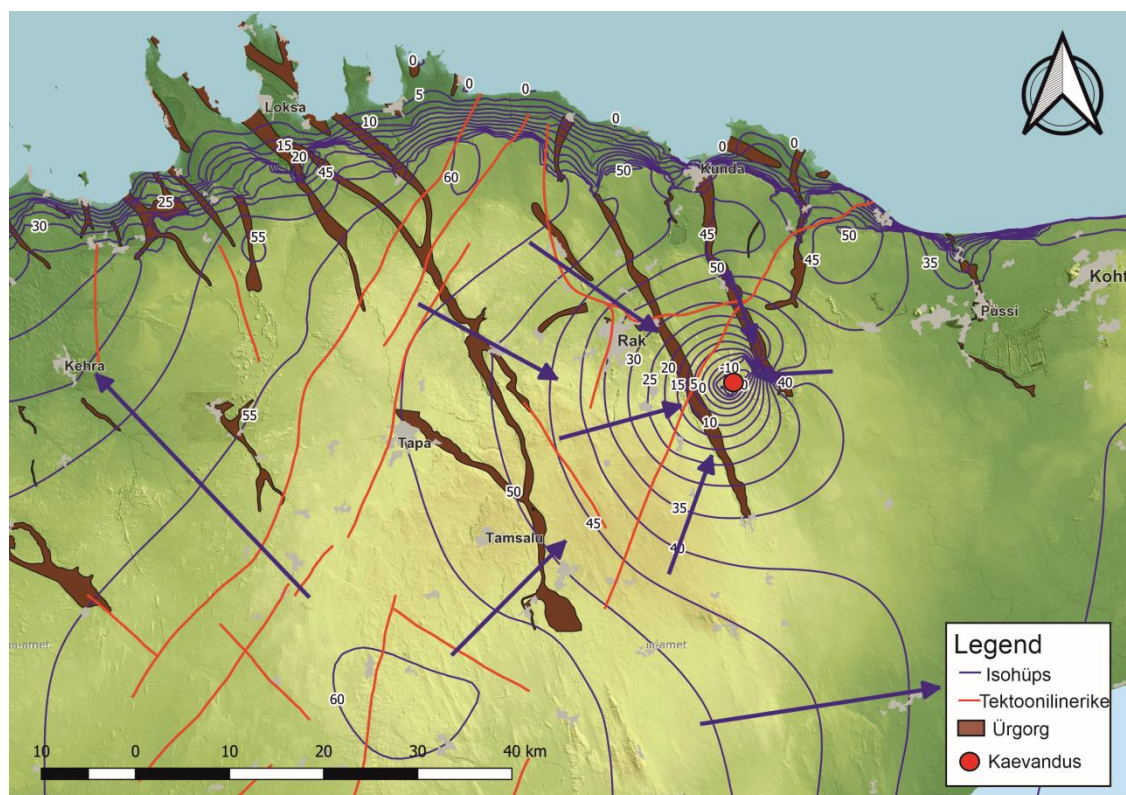
Eestis olevatest fosforiidi leiukohtadest on kõige kasumlikumaks arvatud Rakvere leiukoht, tänu oma suurele varule: P_2O_5 sisaldus on kogu ulatuses 7-19% ning lasundi paksus on keskmiselt 8 m (Pirrus 2000). Rakvere leiukohas on eraldatud Kabala uurimisväli, kus on tehtud kõige põhjalikumad geoloogilised uuringud. Fosforiidi kihti katavad lisaks Keila, Oandu ja Rakvere lademete karbonaatkivimitele ka glaukoniitliivakivi, põlevkivi ning pinnakate (Joonis 9). Katendi kogupaksus ulatub 100 m, mis teeb võimalikuks vaid allmaakaevandamise (Jõelet & Polikarpus 2019). Rakvere maardla Kabala piirkonnas on põhjaveekihi looduslik survetase keskmiselt 55 m ü.m.p (Joonis 10).



Joonis 9. Põhjavee voolu suunad ja survetasemete alandused O-Ca veekihi Kabala kaevanduse rajamisel. Läbilõige Kundast Viru-Jaagupini.

5.2 Kaevanduse mõju põhjavee-survetasemetele

Kabala piirkonda tekkiv depressioonilehter oleks ulatuslikum kui Toolse maardla kaevanduse puhul (Joonis 10), kuid kuna Kabalasse on planeeritud allmaakaevandus, siis tingimusel, et lasuvad veepidemed ei purune ja veejuhtivus nendes ei kasva, ei tekiks depressioonilehter ülemistesse põhjaveekihtidesse nii laialdaselt võrreldes Toolse avatud kaevandusega (Jõelet & Polikarpus 2019). Kujuneva depressioonilehtri mõju oleks suurim kaevanduspiirkonnas ning selle ümbruses, kus kujuneb 20-40 m survetasemete alandus (Joonis 10). Depressioonilehter ulatub enim lääne suunas, mõjutades looduslikke põhjavee voolusuundasid loodeosas. Ida pool katkestab depressioonilehtri Kunda mattunud org. Probleeme võib tekkida vertikaalsuunalisel vee voolul: kui fosforiidikihti katvate Alam-Ordoviitsiumi või Uhaku veepideme veejuhtivus kasvab (kaevanduse laed hakkavad lekkima), võib see kaasa tuua ülemiste veekihi survetasemete olulised langused ja kiire hapnikurikka vee voolu ülemistest põhjaveekihtidest, mis mõjutaks läheduses olevate kaevude veetasemeid ning halvemal juhul veekihi kuivamist (Jõelet & Polikarpus 2019).



Joonis 10. Survetasemed ja põhjavee voolamise suunad Kabala kaevanduse rajamisel O-Ca veekihis (Jõelet & Polikarpus 2019 järgi).

5.3 Kaevanduse mõju põhjavee keemilisele koostisele

Allmaakaevanduse rajamine Rakvere maardlasse Kabala piirkonda mõjutaks ilmselt O-Ca veekihi keemilist koostist vähem kui Toolse maardla kaevandus, sest Kabala kaevevälja alal ei esine graptoliitargilliiti. Siiski leidub püriiti fosforiidis (küll mitte nii ulatuslikult kui graptoliitargiliidis) ning kaevanduse rajamisel puutuks see kokku õhuhapnikuga. Koos kivimis esineva veega põhjustataks see püriidi oksüdatsiooni ning ümbritsevate vete hapestumise. Kuigi fosforiidi keemilised analüüsid viitavad karbonaatsete mineraalide esinemisele (Tabel 1) ning pH kiirele neutraliseerumisele (Joonis 11), pole mineraalide paiknemine kivimis üheselt selge. Püriidi pesaline levik ning paiknemine eemal karbonaatsetest struktuuridest soodustaks lokaalset vete hapestumist. Püriidi hajuslevikul hapestumist tõenäoliselt ei ilmneks.

Looduslikud veed sisaldavad üldfosforit väga väikestes kogustes (kuni 0,05 mg/l; Vainu & Terasmaa 2014), kuid pH langusega tõuseb fosfori lahustuvus, mis võib kaasa tuua kõrge fosforisisalduse kaevandusest väljuvas vees. Kuna põhjaveevool on kaevanduse suunas (Joonis 10), ei ole ka ohtu, et kaevandusvesi mööda veekihti laiali valguks. Küll võib fosfor-reostust kanduda kaevandusest eemale väljajuhitava veega, mis jõudes pinnavette võib põhjustada veekogude eutrofeerumist ja ökosüsteemide muutumist (Schindler 1971).

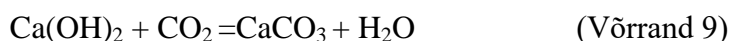
Fosforiidis leiduvates käsijalgsete loomade fosfaatsetes kodades esineb lisaks P_2O_5 -le ka raskmetalle, kuid selle alaseid detailsemaid uuringuid pole siiani tehtud (Hade et al 2017). Siiski on arvatud, et P_2O_5 sisaldus fosforiidis on otseses seoses uraani sisaldusega kodades (Petersell et al 1991). P_2O_5 on seostatud samuti arseenisisaldusega, kuigi viimase kogused pole ilmselt kriitiliselt suured (Jüri Nemliheri suuline teade 2019). Võib oletada, et võimalik hapestumine kivimis toob kaasa reostumise metallidega, kuid ilmselt mitte väga ulatuslikuult.

Allmaakaevanduse suurimaks probleemiks Kabala kaeveväljal on lagede läbivajumine, mida põhjustab lasuvate veepidemete deformeerumine ja lõhelisus (Jõelet & Polikarpus 2019). Selle vältimise parimaks võimaluseks on peetud kaevanduse tagasitäitmist põlevkivituhaga (Pihu et al 2019), mis on oma aluselise tõttu liigitatud ohtlikuks jäätmeiks (Raukas & Punning 2009). Täites kaevanduskäike aluselise tuhaga, on oht kõrge pH-ga leovete tekkeks.

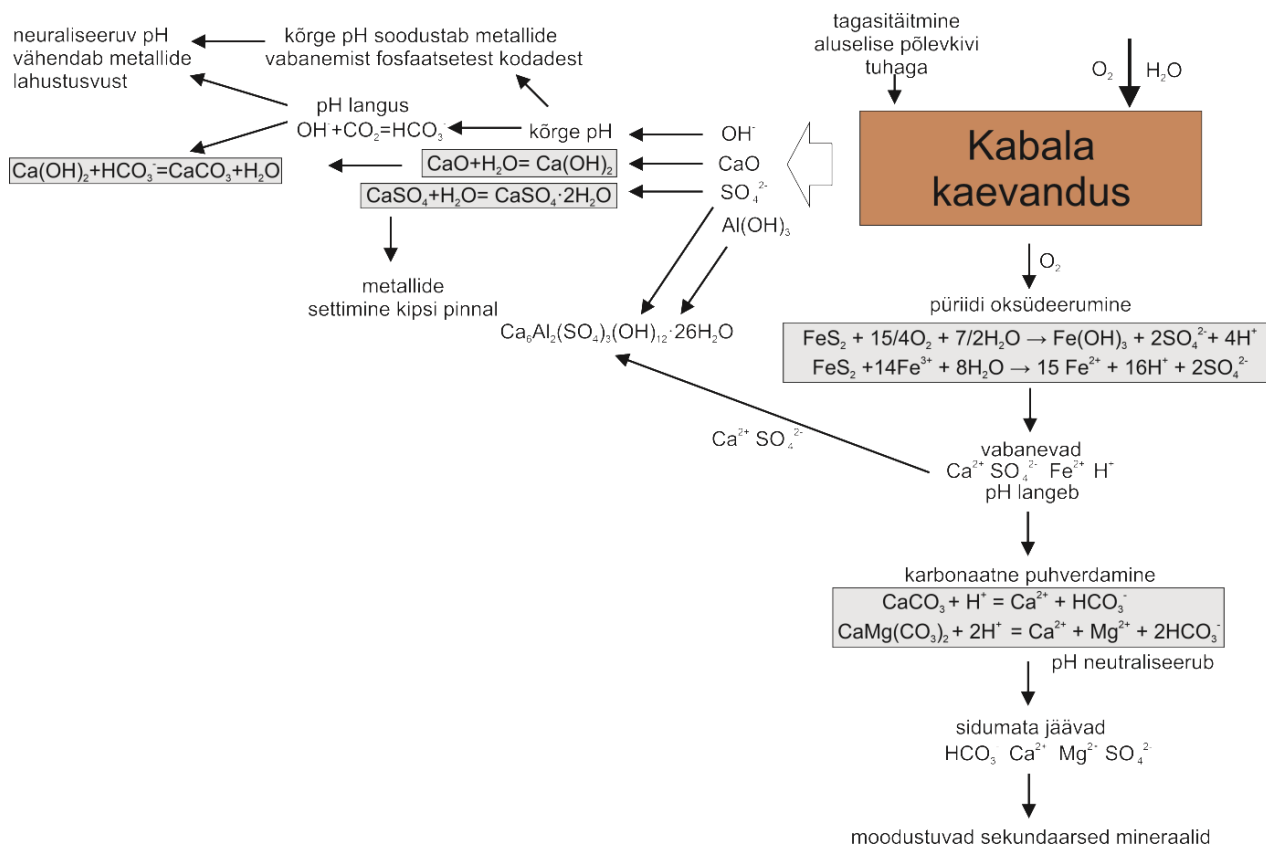
Veega kokkupuutudes tekib tuhas oleva CaO kustumise reaktsioon (Võrrand 8), mis tekitab tugevalt aluselise ühendi – portlandiidi (Ca(OH)_2), mis võib tõsta pH väärtuseni 13.



Tekkiva leovee pH-d vähendab ettringiidi ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) tekkimine (Marandi et al 2019), kuid vee pH-d saab kiiresti puhverdada CO_2 juhtimisega täitealale (CO_2 ladustamine), millega kaasneb kaltsiidi settimine (Võrrand 9 ja Joonis 11).



Ajutiselt kõrgeenenud pH-ga vesi võib soodustada ka metallide lahustumise fosfaatsetest kodadest, kuid pH neutraliseerumisel väheneb ka metallide lahustuvus ja mobiilsus (Appelo & Postma 2005). Metallide mobiilsust vähendavad ka kipsistumisprotsessid. Enamasti ilmneb kipsistumine kaevanduse seintel peale kaevanduse sulgemist ja põhjaveetaseme normaliseerumist (Puura & Puura 2007). Põlevkivituhk sisaldab vääveloksiide, mis reageerides vaba kaltsiumiga moodustab esialgu anhüdriidi (CaSO_4), mis hiljem kipsistub. Lahustunud metallid kalduvad absorbeeruma kipsi pinnale (Bowell 2004) ning mattuvad setendisse. Siiski ei ole sellega võimalik probleemi elimineerida, sest kips lahustub vees suhteliselt kergesti ning keskkonnatingimuste muutumisel (keemilise tasakaalu muutudes ning kipsi lahustumisel) võivad kipsi akumulierenud elemendid kergesti eralduda ning liikuda kaevandusalast eemale ja sattuda tarbekaevudesse.



Joonis 11. O-Ca veekihi keemilised muutused Kabala kaevanduse rajamisel.

Kokkuvõte

Rahvastiku kasvu tõttu on kasvanud surve põllumajanduse intensiivtootmiseks, mis nõuab suuremas koguses mineraalväetisi. Seoses sellega on perspektiivseks fosfori allikaks muutunud ka Eesti fosforiidi maardlad, mis levivad O-Ca põhjaveekihis. Põhjaveekihile on iseloomulik suur hüdrogeoloogiline heterogeensus. Põhjaveekihis on esindatud nii aktiivne kui passiivne veevahetustsoon. Fosforiidikaevanduste rajamine Eestis tähendab põhjaveekihi avamist ning sealse põhjavee dünaamika ja keemilise koostise muutumist kaevanduspiirkonnas. Käesolev bakalaureusetöö esitles kaks kontseptuaalset mudelit muutustest O-Ca põhjaveekihis nii aktiivses (Toolse maardla) kui passiivses veevahetuspriirkonnas (Kabala maardla).

Toolse maardlasse kaevanduse rajamine mõjutab O-Ca põhjaveetasemeid vähem kui kaevanduse rajamine Kabala maardlasse, kuid hüdraulilise rõhu alandused tekiksid ka ülemistesse Ordoviitsiumi põhjaveekihtidesse. Probleemiks võivad kujuneda piirkonna ürgorud, mis võimaldavad pindmiste põhjavete kiiret infiltratsiooni kaevandusse. Suurimaks keskkonnariskiks võib hinnata Toolse fosforiidi maardlat katvat graptoliitargilliidi kihti, mis sisaldab suures koguses püriiti (4-6%) ning raskmetalle. Avatud graptoliitargilliidis intensiivistuksid leostumisprotsessid õhuhapniku ning sademevee koosmõjul. Tekkivad happelised veed soodustaksid raskemetallide ja sulfaatide sisalduste kasvu põhja- ja pinnavees. Tänu hapnikurikka vee juurdevoolule võib toimuda ka uraani ümberkanne ning hilisem uraani tütarelementide (^{226}Ra ja ^{222}Rn) kiirgusreostuse ilmnemine kaevanduspiirkonnas.

Kaevanduse rajamine Kabala piirkonda tekitab küllaltki ulatusliku survetasemete alanduse O-Ca põhjaveekihis, kuid ülemised veekihid jääksid sellest oluliselt mõjutamata, juhul kui suudetakse vältida kaevanduslae deformeerumist. Kabala kaevandusala põhjavee keemilises koostises ei ole eeldatavad nii suured muutused kui Toolse maardla puhul, sest graptoliitargilliiti piirkonnas ei esine. Fosforiidis leidub küll püriiti, kuid väheses koguses ning tekkinud happeline vesi puhverdataks kiirelt nii fosforiidis kui põhjaveekihi kivimites levivate karbonaatmineraalide poolt. Suurimaks keemiliseks riskifaktoriks võib Kabala kaevanduse puhul hinnata võimalikku fosfaatreostuse levikut ümbruskonda läbi kaevandusvete väljapumpamise.

Suurimaks insener-tehniliseks probleemiks Kabala kaevanduse puhul on suur kaevanduslagede läbivajumise oht. Et ennetada lagede läbivajumist ning seeläbi vältida ka veejuhtivuse muutumist pealmistes kihtides ja „kuivamist“, on kõige otstarbekamaks peetud kaevanduse tagasitäitmist põlevkivituhaga, kuid see põhjustaks aluseliste vete levikut kaevanduspiirkonnas. Aluseline vesi võib samuti tõsta metallide lahustuvust ning mobiiliseerida fosforiidis sisalduvaid raskmetalle. Siiski ei tohiks tagasitäitmisel levivad aluselised veed endast kujutada olulist keskkonnariski, sest segunemisel põhjaveega ning aereerimisel CO₂-ga neutraliseeruksid aluselised veed küllaltki kiiresti. Peale kaevandustegevuse lõpetamist ja põhjavee survetasemete taastumist võib kaevanduses ladestunud kips vees lahustuda ning emiteerida sulfaatset jääkreostust tarbekaevudesse.

Summary

As the population and people's wealth are growing, more and more food needs to be produced, which means even more intensive use of phosphate fertilizers. Therefore, Estonian phosphorus deposits are becoming relevant. Estonian phosphorus deposits are located in the Ordovician-Cambrian aquifer, which means massive changes of hydrodynamics and chemical compositions in the aquifer.

Hydrogeological conceptual models are useful tools to present the problems and solutions of the hydrogeological systems through visualized schemes. The aim was to introduce earlier conceptual models of the Ordovician-Cambrian aquifer and to present two new conceptual models in active mining zone in the same aquifer.

Opening a mine in Toolse deposit will lower hydraulic levels, but less than in the Kabala deposit. Though an open-pit mining also lowers upper aquifers pressure levels. There might be also a problem with Kunda river valley, where oxygen rich groundwater flows through the valley to the O-Ca aquifer. The main environmental risk is the graptolite argillite, which covers the phosphorus. Graptolite argillite contains pyrite and heavy metals and when graptolite argillite is opened to oxygen and precipitation the leaching processes cause acidic waters in the mine area and sulphate concentrations increase in the ground- and surface waters. As the pH lowers the solubility of the metals increases, which might cause pollution of the metals in the surface and groundwater.

In Kabala region, opening an underground mine causes an extensive pressure level depression, but the levels in upper aquifers will not change remarkably, if the water conductivity in aquicludes will not change. The best solution to prevent this problem is to fill the mining passes with oil shale ash, which causes alkaline waters in mine, but these will be buffered quickly with carbonates. Main risk in water pollution is the phosphate pollution in the nearby areas by pumping out mine waters. When the mining stops and the water pressure levels are recovered, the gypsum on the mine walls will dissolve into groundwater and higher sulphate concentrations will occur in nearby wells.

Tänuavaldused

Minu suurimad tänuavaldused lähevad minu juhendajatele, Valle Raidlale ja Enn Karrole, kellela ei oleks see töö valmis saanud. Lisaks ma tänan Kadriann Tamme, Magdaleena Männikut, Jüri Nemliheri ja Argo Jõehte osutatud abi eest ning oma kursusekaaslast, kes mulle suureks toeks olid.

Kasutatud kirjandus

- Appelo, C. A. J., ja D. Postma. 2005. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. Leiden, Holland: A.A. ASTM.
- Björck, S. 1995. „A Review of the History of the Baltic Sea, 13,0-8,0 ka BP“. *Quaternary International*, nr 27: 19–40.
- Bottrell, S. H., ja M. Tranter. 2002. „Sulphide oxidation under partially anoxic conditions at the bed of the Haut Glacier d’Arolla, Switzerland“. *Hydrogeological Processes*, nr 16: 2363–68.
- Bowell, R. J. 2004. „A review of sulphate removal options for mine waters“. *Proceedings International Mine Water Association Symposium*, nr 2: 75–91.
- Clason, C. C., P. J. Applegate, ja P. Holmlund. 2014. „Modelling Late Weichselian evolution of the Eurasian ice sheets forced by surface meltwater-enhanced basal sliding“. *Journal of Glaciology*, nr 60: 29–40.
- Enemark, T., L. J. M. Peeters, D. Mallants, ja O. Batelaan. 2019. „Hydrogeological conceptual model building and testing: A review“. *Journal of Hydrology*, nr 569: 310–29.
- Erg, K. 2005. „Changes in groundwater sulphate content in Estonian oil shale mining area“. *Oil Shale*, nr 22 (3): 275–89.
- Euroopa Komisjon. 2010. „Guidance on Risk Assessment and the Use of Conceptual Models for Groundwater“. 26. Luxembourg: European Communities.
- Gerber, C., R. Vaikmäe, W. Aeschbach, A. Babre, W. Jiang, M. Leuenberger, Z.-T. Lu, et al. 2017. „Using 81Kr and noble gases to characterize and date groundwater and brines in the Baltic Artesian Basin on the one-million-year timescale“. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, nr 205: 187–210.
- Hade, S., ja A. Soesoo. 2014. „Estonian graptolite argillites revisited: A future resource?“ *Oil Shale*, nr 31: 4–18.
- Hade, S., M. Voolma, ja A. Soesoo. 2017. „Eesti graptoliitargilliidis leiduvate raskemetallide ja teiste elementide keskkonnamõju mudel ning leostumise dünaamika“. Tallinn: Tallina Tehnikaülikooli Geoloogia Instituut.
- Heidel, Tichomirowa, ja Junghans. 2009. „The influence of pyrite grain size on the final oxygen isotope difference between sulphate and water in aerobic pyrite oxidation experiments“. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, nr 45: 321–42.

- Jõelet, A., ja M. Polikarpus. 2019. „Virumaa maavarade võimaliku kaevandamise keskkonnamõjud põhja- ja pinnaveele ning maastikule keskkonnageoloogiliste mudelitega analüüsituna koos alternatiivsete leevendusmeetmetega“. 4. Hüdrokeoloogiline modelleerimine. Tartu. http://virumudel.ut.ee/sites/default/files/virumudel/files/k4_hydrogeoloogiline_modelleerimine.pdf.
- Marandi, A., E. Puura, ja E. Karro. 2019. „Virumaa maavarade võimaliku kaevandamise keskkonnamõjud põhja- ja pinnaveele ning maastikule keskkonnageoloogiliste mudelitega analüüsituna koos alternatiivsete leevendusmeetmetega“. 6. Geokeemilised tingimused. Tartu. http://virumudel.ut.ee/sites/default/files/virumudel/files/k6_geokeemia.pdf.
- Mays, C. W., R.E. Rowland, ja A. F. Stehney. 1985. „Cancer risk from the lifetime intake of Ra and U isotopes“. *Health Physics*, nr 48: 635–47.
- Mogollon, J. M., A. H. W. Beusen, H. J. M van Grinsven, H. Westhoek, ja A. F. Bouwman. 2018. „Future agricultural phosphorus demand according to the shared socioeconomic pathways“. *Global Environmental Change*, nr 50: 149–63.
- Perens, R., L. Savitski, V. Savva, S. Jaštšuk, ja M. Häelm. 2012. „Põhjaveekogumite piiride kirjeldamine ja põhjaveekogumite hüdrokeoloogiliste kontseptuaalsete mudelite koostamine“. Tallinn: OÜ Eesti Geoloogiakeskus.
- Petersell, V., J. Kivisilla, E. Pukkonen, A. Põldvere, ja K. Täht. 1991. *Evaluation of Ore Events and Mineralization Points in Estonian Bedrock and Crystalline Basement*. Tallinn: Geological Survey of Estonia.
- Petersell, V., Eesti Geoloogiakeskus, ja Sveriges Geologiska Undersökning. 1997. *Eesti mulla huumushorisondi geokeemiline atlas*. Tallinn: EGK & SGU.
- Pihu, T., A. Konist, E. Puura, M. Liira, ja K. Kirsimäe. 2019. „Properties and environmental impact of oil shale ash landfills“. *Oil Shale*, nr 36 (2): 257–70.
- Pirrus, E.. 2000. *Maavarade geoloogia*. Tallinn: TTÜ Kirjastus.
- Pisapia, C., M. Chaussidona, C. Mustinb, ja B. Humbert. 2007. „O and S isotopic composition of dissolved and attached oxidation products of pyrite by *Acidithiobacillus ferrooxidans*: comparison with abiotic oxidations“. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, nr 71: 2474–90.
- Puura, E. 1998. „Weathering of Mining Waste Rock Containing Alum Shale and Limestone: A Case-study of the Maardu Dumps, Estonia“. Stockholm: University of Stockholm.
- Puura, V., ja E. Puura. 2007. „Origins, compositions, and technological and environmental problems of utilization of oil shales.“ *Estonian Journal of Earth Sciences*, nr 56 (3): 185–87.
- Pärn, J., V. Raidla, R. Vaikmäe, T. Martma, J. Ivask, R. Mokrik, ja K. Erg. 2016. „The recharge of glacial meltwater and its influence on the geochemical evolution of groundwater

in the Ordovician-Cambrian aquifer system, northern part of the Baltic Artesian Basin“. *Applied Geochemistry*, nr 72: 125–35.

Pärn, J., J. Ivask, H. Tõnisson, E. Kaup, K. Urtson, ja A. Heinsalu. 2017. „Maardu fosforiidilevila tehnogeense põhjavee kvaliteedi uuring“. 10963. Tallinn: Tallina Tehnikaülikooli Geoloogia Instituut.

Pärn, J., S. Affolter, J. Ivask, S. Johnson, K. Kirsimäe, M. Leuenberger, T. Martma, et al. 2018. „Redox zonation and organic matter oxidation in palaeogroundwater of glacial origin from the Baltic Artesian Basin“. *Chemical Geology*, nr 488: 149–61.

Pärn, J., K. Walraevens, M. van Camp, V. Raidla, W. Aeschbach, R. Friedrich, J. Ivask, et al. 2019. „Dating of glacial palaeogroundwater in the Ordovician-Cambrian aquifer system, northern Baltic Artesian Basin“. *Applied Geochemistry*, nr 102: 64–76.

Raidla, V., Z. Kern, J. Pärn, A. Babre, K. Erg, J. Ivask, A. Kalvans, et al. 2016. „A $\delta^{18}\text{O}$ isoscape for the shallow groundwater in the Baltic Artesian Basin“. *Journal of Hydrology*, nr 542: 254–67.

Raukas, A., ja J.-M. Punning. 2009. „Environmental problems in the Estonian oil shale industry“. *Energy & Environmental Science*, nr 2: 723–28.

Refsgaard, J.-C., ja H.-J. Henriksen. 2004. „Modelling guidelines—terminology and guiding principles“. *Advances in Water Resources*, nr 27: 71–82.

Schindler, D. W. 1971. „Carbon, nitrogen, and phosphorus and the eutrophication of freshwater lakes“. *Journal of Phycology*, nr 7: 321–29.

Spijker, J., R. Lieste, M. Zijp, ja T. de Nijs. 2010. „Conceptual models for the Water Framework Directive and the Groundwater Directive“. 607300015. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM).

Sterckx, A., J.-M. Lemieux, ja R. Vaikmäe. 2018. „Assessment of paleo-recharge under the Fennoscandian Ice Sheet and its impact on regional groundwater flow in the northern Baltic Artesian Basin using a numerical model“. *Hydrogeology Journal*, nr 26: 1–18.

Vainu, M., ja J. Terasmaa. 2014. „Changes in climate, catchment vegetation and hydrogeology as the causes of dramatic lake-level fluctuations in the Kurtna Lake District, NE Estonia“. *Estonian Journal of Earth Sciences*, nr 63 (1): 45–61.

Vallner, L., ja R. Perens. 1997. *Geology and Mineral Resources of Estonia*. Tallinn.

Vogel, J. C., A. S. Talma, T. H. E. Heaton, ja J. Kronfeld. 1999. „Evaluating the rate of migration of an uranium deposition front within the Uitenhage Aquifer“. *Journal of Geochemical Exploration*, nr 66: 269–76.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Liisa-Mai Nurk,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Ordoviitsium-Kambriumi põhjaveekihi kontseptuaalsed mudelid fosforiidi kaevandamise tingimustes,

mille juhendajad on Valle Raidla ja Enn Karro,

1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab kasutada teost ärieesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandit ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Liisa-Mai Nurk

Tartus, 1.06.2019